

CCD 잔존영상 분석

진호[†], 이충욱, 김승리, 강용범, 구재림, 한원용
한국천문연구원

A STUDY OF RESIDUAL IMAGE IN CHARGED-COUPLED DEVICE

Ho Jin[†], C.-U. Lee, S.-L. Kim, Y. B. Kang, J.-L. Goo, and W. Han
Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea
E-mail: jinho@kasi.re.kr

(Received September 15, 2005; Accepted November 15, 2005)

요 약

CCD 영상센서의 경우 포화 상태를 초과하는 막대한 양의 광자가 조사될 때 Si-SiO₂ 접합 면에서 전하가 포획될 수 있으며 이 접합 면에 남아 있는 전하와 관련되어 잔존영상이 보일 수 있다. 이러한 잔존영상은 특히 전면조사 방식의 CCD에서 일어 난다. 이 현상이 정밀 측광에 영향을 줄 수 있음에도 불구하고 잔존영상에 대한 정량적인 분석과 보고가 국내에서는 찾아보기 힘들었다. 이에 본 연구에서는 전면조사 방식의 CCD를 사용하는 레몬산천문대 관측자료의 암전자화면에서 잔존영상을 확인하고 잔존영상이 관측에 미칠 수 있는 영향을 분석해 보았다.

ABSTRACT

For an image sensor CCD, electrons can be trapped at the front-side Si-SiO₂ surface interface in a case of exceeding the full well by bright source. Residual images can be made by the electrons remaining in the interface. These residual images are seen in the front-side-illuminated CCDs especially. It is not easy to find a quantitative analysis for this phenomenon in the domestic reports, although it is able to contaminate observation data. In this study, we find residual images in dark frames which were obtained from the front-side-illuminated CCD at Mt. Lemmon Optical Astronomy Observatory (LOAO), and analyze the effect to contaminated observation data by residual charges.

Key words: CCD, residual image, analysis

1. 서 론

CCD(Charged-Coupled device)는 일반적인 상용 제품뿐만 아니라, 극미광 측정을 요하는 천문 관측 분야 및 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 특히, 고감도의 CCD를 사용하는 극미광 측정 분야에서는 보다 정확한 광량을 측정하기 위해 기기적 특성을 제거하는 전처리과정을 거친다. 영상 보정에는 전자적인 잡음, 열잡음, 광학계의 결함 및 화소간의 양자효율의 차이등에 대한 정보를 담고

[†]corresponding author

표 1. 레몬산천문대 1m 망원경 2K CCD 카메라 제원.

항 목	제 원
CCD 카메라	FLI IMG 4301E
CCD	KAF 4301E(KODAK)
유효화소	2084×2084 (24 μ m ² /화소)
F.O.V.	22.2×22.2arcmin ²
이득값	3e ⁻ /ADU
암전자잡음 발생율	0.1e ⁻ /at -30°C
읽기잡음	15e
읽기시간	30sec/frame
전하전달효율(CTE)	0.99999(2MHz)

있는 영점영상(bias frame), 암전자영상(dark frame), 바닥 고르기 영상(flat frame) 등이 사용되며, 이러한 잘 알려진 영상 보정 이외에도 고 정밀 측광을 위해서 잔존영상에 대한 보정이 있을 수 있다.

잔존영상이란 여러 층으로 제작된 CCD 센서에 막대한 양의 광자가 조사되면 영상을 읽어 낸 후에도 CCD 내부의 구조 접합면 사이에 남아 있는 전하가 일정시간동안 암전자영상 노출시에 전하전달영역으로 옮겨져 보이는 현상이다. 일반적인 조건하에서 암전자영상을 얻으면 관측자는 균일한 영상을 얻게 되는 반면, 의도적으로 강한 빛에 CCD를 노출시킨 후 암전자영상을 얻게 되면 이전에 찍은 영상의 잔존영상이 나타나게 된다. 이러한 현상에 대한 연구는 허블 망원경의 WFPC의 CCD에 대한 성능 평가에 대한 자료(Biretta & Mutchler 1998), ESO의 CCD 성능 평가(Cavadore et al. 2000), KODAK CCD 성능 평가(Rest et al. 2002) 등에서 보고된 바 있다.

CCD 영상센서는 수광 영역을 선택하여 제작하는 과정에 따라 전면조사(Front-illumination)와 후면조사(Back-illuminated) 방식으로 구분되며, CCD의 개발 초기에는 전면조사 방식의 CCD가 많이 개발되어 사용되다가 양자 효율의 극대화를 위하여 최근 들어 후면조사 방식의 CCD가 널리 사용되고 있다. 한국천문연구원, 보현산천문대와 소백산천문대에서는 잔존전하가 포획될 공간이 거의 없는 후면조사 방식의 CCD를 사용하고 있기 때문에 정밀 측광에 악영향을 줄만한 잔존영상의 문제가 없었다. 그러나, 레몬산천문대(Arizona, Tucson 소재)와 같이 전면조사 방식을 사용하는 CCD의 경우에는 잔존전하가 접합면 사이에 축적되어 잔존영상이 남게 됨으로 이에 대한 고려가 이루어져야 한다.

잔존영상은 주로 전면조사 방식 CCD에서 일어나는 현상으로서 정밀 측광에 영향을 줄 수 있음에도 불구하고 국내에서는 잘 알려져 있지 않았으며 정량적인 분석에 대한 자료를 찾기가 힘들다. 또한 전면조사 방식의 CCD 카메라들이 대학과 연구소 및 아마추어 천문가에게 많이 보급되어 활용되고 있기 때문에 이러한 잔존영상 정보 및 측광 관측에 미칠 수 있는 영향에 대한 인식이 필요하다. 이에 본 연구에서는 현재 레몬산천문대에서 사용하고 있는 전면조사 방식 CCD를 이용하여 잔존영상의 존재를 확인하고 관측에 미칠 수 있는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 잔존영상의 특성과 자료 획득

잔존영상은 CCD 제작 시, 여러 층으로 이루어진 센서의 구조 문제로 인한 것으로 CCD 수광부 전반에 걸쳐 전하를 읽어낼 때 특정 부위에 남아 있는 전하가, 전하 전달 시 완전히 옮겨지지 못하

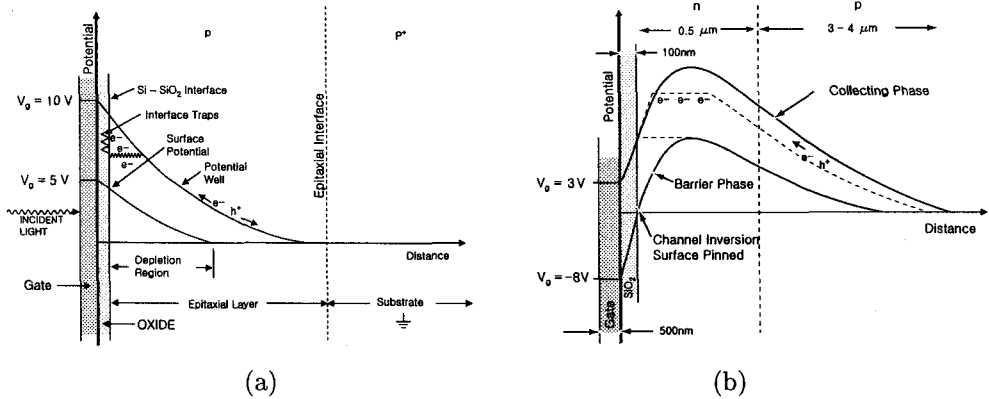


그림 1. (a) 표면전형태 CCD에서의 전위우물 생성도면, (b) n형 불순물을 도포한 CCD에서의 전위우물 생성도면(Janesick 2001).

고, 관측 영상이나 암전자영상 노출시 서서히 전하 전달 영역으로 스며들어 획득한 영상에 잔존영상이 나타나 보이는 현상이다. 이러한 잔존영상은 전면조사 방식 CCD의 Si-SiO₂ 접촉면과 관련이 있다. 입사된 광자가 화소의 포화량을 초과하여 과포화 상태에 이르게 되면 전하들은 Si-SiO₂ 접합면에 묶여지게 되고 이때 묶여진 전자는 나중에 잔존영상으로 나타나게 된다.

초기 CCD의 경우, 전하는 반도체의 표면에 저장되고 이 표면을 따라 전달되는 구조였다. 이러한 surface-channel CCD의 경우 신호 전하가 Si-SiO₂ 접합면에 묶이게 되어 그림 1a의 interface trap 영역에 전자들이 남아 있게 된다. 이 잔존전하들은 전하 전송 시에 전달되지 못하고 남아 있게 되어 전하 전달 효율을 떨어뜨리거나 나중에 잔존영상으로 나타나게 된다. 보다 큰 수광 영역과 효율적인 전하 전달을 가지는 CCD의 개발이 늦어진 이유도 바로 이 때문이며, 이 문제를 해결하기 위해 그림 1b와 같은 buried-channel CCD가 새롭게 고안된다. 이는 n형 불순물을 얇게 도포 함으로써 potential well이 표면에서 멀리 발생되어 잔존전하가 Si-SiO₂ 접합면에서 포획되는 것을 막아낼 수 있다(Kim et al. 1972). 물론 CCD의 구동에 있어 인가되는 전압에 따라 상당한 차이를 보이지만 이러한 공정으로 전하 전달 효율을 99.9999% 까지 끌어올릴 수 있게 되었다. buried-channel 방식의 CCD도 얇은 박막과 과잉 노출로 인하여 잔존전하들이 존재할 수는 있으나 surface-channel CCD에 비하면 그 크기는 상대적으로 아주 미약한 정도이다(Jack & Dyck 1976).

한국천문연구원의 레몬산천문대에서는 1m 자동 망원경을 이용하여 성단의 시계열 측광을 수행해 오고 있으며 현재 사용중인 2K CCD 카메라에 대한 제원은 표 1과 같다. 표에서 보인바와같이 2K CCD는 약 22분 정도의 시야각을 가지고 있으며, 우리는 시야에 들어오는 대부분의 별들을 측광하기 위하여 장시간 노출과 단시간 노출을 하여 어두운 천체와 밝은 천체의 측광 관측을 수행했다.

이 과정에서 어두운 천체를 관측하기 위해 장시간 노출을 주면 상대적으로 밝은 별의 경우 CCD 표면에서 포화되어 전하가 넘치는 현상이 발생하며 CCD가 읽어 내는 방향으로 영상이 흐르는 모습을 쉽게 볼 수 있다. 이렇게 CCD가 포화되면 잔존전하가 Si-SiO₂ 접합면에 속박되는데, 이때의 발생량은 입사 파장과 CCD의 작동 전원 등의 조합에 따라 다르게 나타날 수 있다.

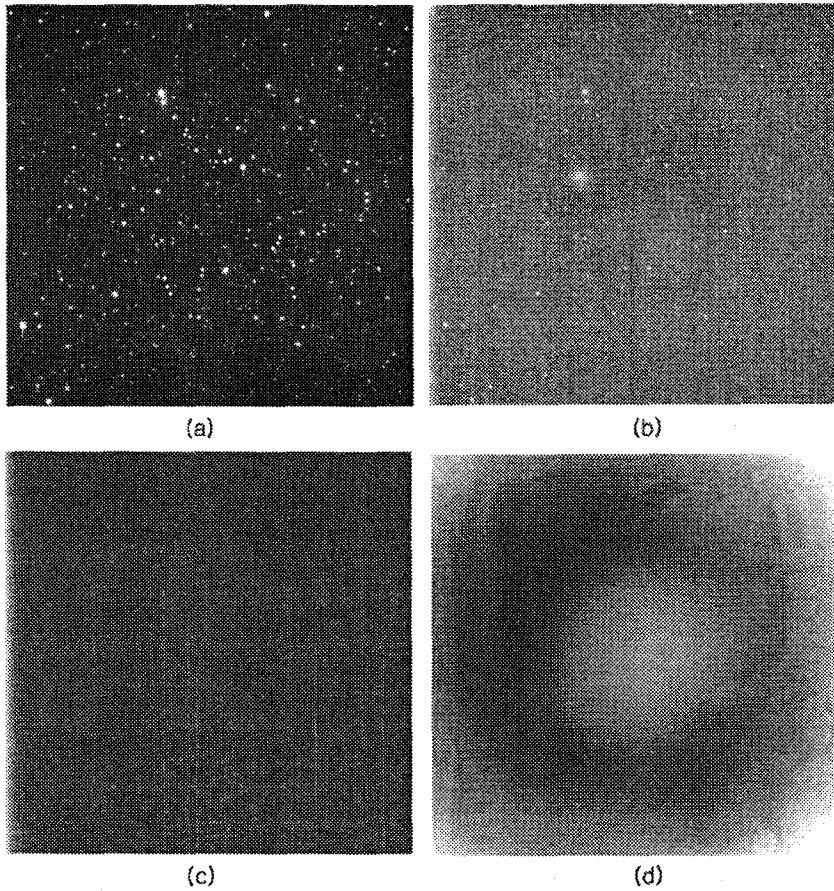


그림 2. 전면조사 방식의 CCD를 사용하는 레몬산천문대에서 관측한 M35의 영상. (a) V-밴드에서 600초 노출하여 얻은 관측영상, (b) 관측영상 직후 600초 노출로 얻은 암전자영상에 나타난 잔존영상, (c) 영점영상, (d) 바닥고르기 영상도 함께 나타내었다.

우리는 잔존영상을 얻기 위하여 전면조사 방식 CCD를 사용하고 있는 레몬산천문대에서 2004년 12월10일에 관측된 M35의 시계열 측광 자료를 사용하였다. M35의 시계열 측광은 V필터만을 사용하여 밝은 천체의 측광을 위해 30초 노출로 1회 관측을 하고, 이어서 어두운 천체의 측광을 위해 10분 노출하여 5회 반복하여 관측하였다. 관측 종료 후 전 처리를 위하여 영점영상과 10분 노출의 암전자영상을 10장씩 찍었다. 관측 당시의 CCD 냉각 온도는 약 섭씨 -30도였으며 CCD는 KODAK 사의 전면조사 방식의 2K($24\mu\text{m}^2$) CCD를 사용하는 Finger Lake(FLI Inc.) 사의 IMGX4301E 모델이다. 그림 2에 관측 영상을 나타내었다. 그림 2a는 M35의 관측 영상이며 그림 2b는 관측 직후 얻은 600초 노출의 암전자영상이다. 암전자영상을 보면 상단 좌측의 M35 성단 관측에서 과포화된 별들의 위치가 그대로 암전자영상 위에서 잔존영상으로 남아있는 것을 볼 수 있으며, 가운데 왼쪽 상단에 넓게 나타난 흰 부분은 레몬산천문대 CCD 카메라의 암전자영상의 특징으로 암전자영상을 얻을 때 마

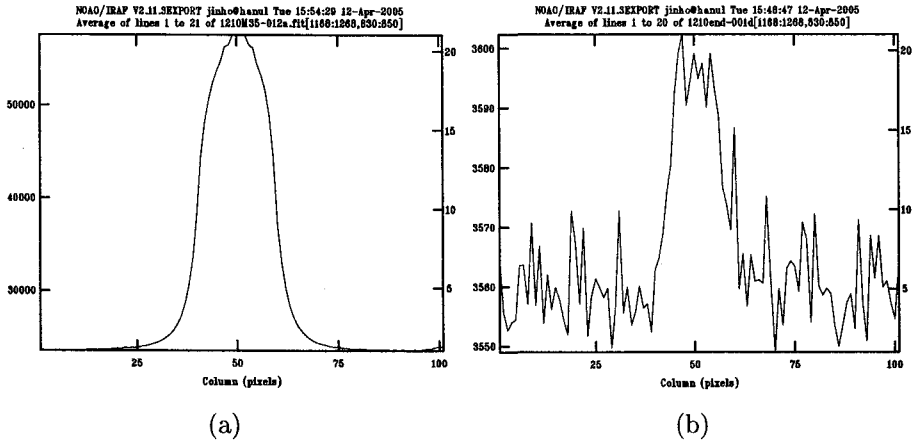


그림 3. (a) 잔존영상의 프로파일. M35 관측 영상에서 포화된 별의 위치에서 line plot한 그림, (b) 잔존영상에서 동일 위치에서 line plot한 그림.

다 동일부분에 나타나는 현상이다. 한편, 예상되는 바와 같이 그림 2c에 위치한 영점영상에서는 잔존전하가 스며드는 시간이 거의 없기 때문에 잔존영상이 보이지 않는다. 그림 2d는 관측 전 V필터로 얻은 바닥 고르기 영상이다.

3. 잔존영상의 분석

우리는 M35 관측 자료를 이용하여 잔존영상의 강도 변화와 이 효과가 정밀 측광에 미칠 수 있는 영향에 대하여 조사 하였다. 그림 3은 M35의 관측 영상 그림 3a와 암전자영상 그림 3b에 나타난 잔존영상에서 과포화된 별의 중심 위치를 읽어내어 각각의 경우에 대해 중심으로부터 여러 선에 걸쳐 평균한 line plot 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 관측 영상에서 과포화가 일어났던 위치의 암전자영상에서 잔존영상이 나타나는 것을 명확히 볼 수 있으며, 그림 3b의 경우에 중심 부분에서 약 40ADU 정도의 광량이 더 포함된 것을 알 수 있다.

잔존영상의 지속 시간은 CCD의 작동 환경, 온도, CCD 자체에 걸리는 전압 등에 따라 매우 다른 결과를 보여 주지만, 본 연구에서는 10분 노출로 얻은 10장의 암전자 영상을 이용하여 분석하였다. 그림 4는 시간에 따른 잔존영상의 강도변화를 나타낸 그림으로 시간에 따라 잔존영상의 강도가 줄어들음을 볼 수 있다. 잔존영상에서 광량을 측정하기 위해 사용한 구경 반지름의 크기는 12.5 화소였다. 또한 잔존강도가 높은 것은 강도가 낮은 것에 비해 상대적으로 강도의 감소량이 큰 것을 볼 수 있다. 이 그림에서 가장 강도가 높은 자료를 대상으로, 선형 회귀 곡선에 맞게 선형으로 변한다고 가정하고 가장 낮은 대상인 5000ADU 수준의 강도까지 내려가는데 걸리는 시간을 추정한 결과 약 180분 정도가 소요됨을 확인 하였다. 여기서 180분이란 10분 노출의 암전자영상을 연속적으로 얻을 때의 값이기 때문에 노출 시간이 다른 경우에는 다른 결과를 나타낼 수 있다. 결과적으로 암전자영상의 분석에서 180분 동안에는 잔존영상에 의한 영향을 받으며, 이 현상이 쉽게 사라 지지 않음을 알 수 있다.

그림 5a는 전체 영상의 암전자잡음 변화 및 영점영상의 변화를 시간에 따라 나타내었다. 달힌 원으로 나타낸 자료는 영점영상의 평균 값을 나타내며, 열린 원은 암전자잡음의 변화를 나타낸다. 그림

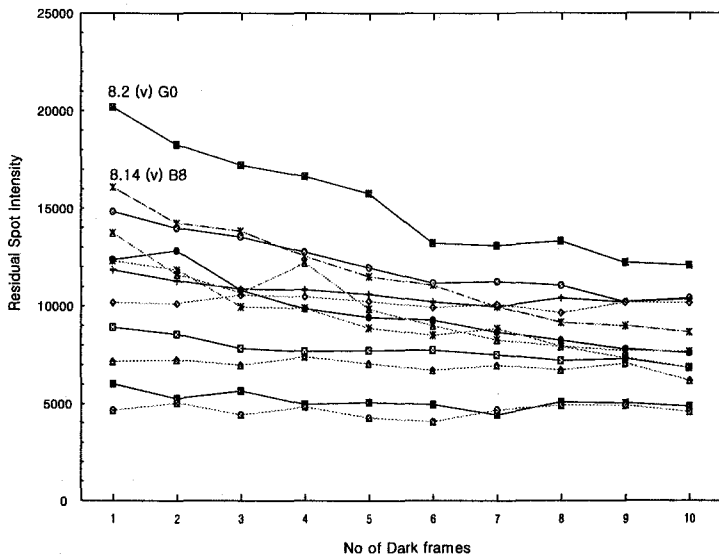


그림 4. 연속된 10개의 암전자영상에서 구경 측광으로 얻은 잔존영상으로 나타난 별 9개 영역에서의 강도 변화

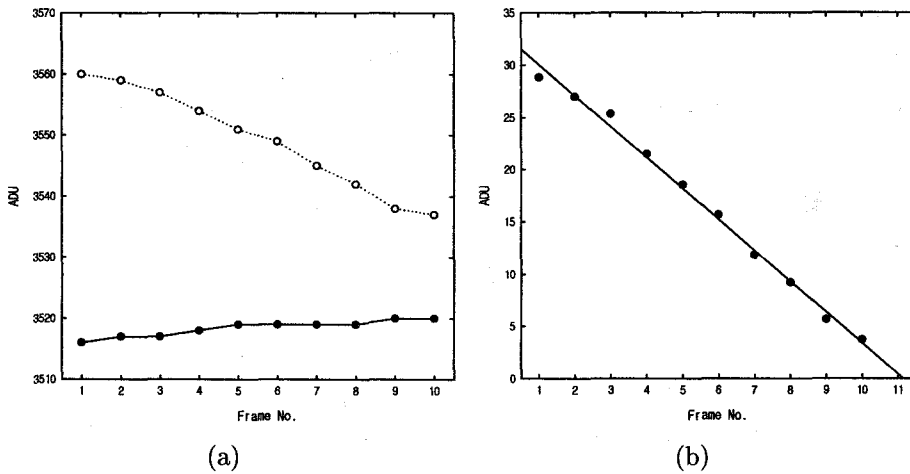


그림 5. (a) 전체 암전자영상에서의 암전자잡음 변화도 및 영점영상 평균값의 변화도, 열린 원은 잔존영상이 없는 영역에서의 암전자잡음 평균 변화 값. 닫힌 원은 영점영상의 평균 변화 값. (b) 구경 측광시 잔존영상에서 별이 있던 영역 밖에 해당하는 영역. 일반적인 구경 측광시 배경 하늘 밝기를 나타낸다.

5b는 잔존영상의 구경 측광시 별이 있던 영역 밖의 값을 나타낸 그림으로 일반적인 구경 측광시 하늘의 밝기 값에 해당하는 영역이다. 이 영역은 반경 25.5화소 거리에서 내부 15.5 구경을 제외한 영역 값을 사용하였다. 그림 5a의 암전자잡음 변화는 그림 5b와 비슷한 경향을 보이고 있으며 포화가 되지 않은 영역이라도 전반적으로 암전자영상의 변화를 볼 수 있었다. 이는 관측 시작시 플레팅 영상

을 얻을 때 밝은 하늘로 인해 포획된 잔존전하 또는 축적된 열잡음 등이 영상을 읽어 낼 때 전자 전 달이 원활히 이루어지지 않은 원인으로 남게 되는 잔존전하량이 영향을 미치는 것으로 보인다. 그러나 이러한 경우는 암전자영상의 전체적인 현상으로 보이며 시계열 측광시 하늘 밝기 값에 포함되기 때문에 별을 측광하는 데 있어 문제가 될 수 있는 오차를 유발하지 않는다. 레몬산천문대 CCD 카메라 사양에 의하면 10분 노출의 암전자영상의 예상되는 암전자전류 수준은 약 6ADU 정도인데 그림 5b를 보면 영점영상 값을 3520ADU 수준으로 가정하여도 마지막 10장의 암전자영상의 평균값과의 차이는 약 17ADU 정도의 차이가 난다. 이는 고유의 암전자전류 이외에도 전반적인 잔존전하의 영향을 받고 있는 것으로 예상된다. 이러한 자료를 통해서 잔존영상이 측광에 영향을 줄 수 있다는 점은 충분히 인정된다. 즉, 장기 및 단기 노출을 번갈아 관측한 경우 장기 노출에서 포획된 별은 단기 노출에서 포획되지 않았어도 잔존영상으로 남아 측광 결과에 영향을 미칠 가능성이 충분히 있다.

이러한 잔존영상은 일반적인 측광 관측 자료 처리시, 다른 날에 얻은 일반적인 암전자영상을 사용하는 경우 측광의 오류를 발생시킬 수 있는 원인이 될 수 있기 때문에 주의가 필요하다. 시계열 측광에서 구경 측광의 경우는 위에선 언급한 경우와 마찬가지로 하늘 밝기 영역 및 암전자영상 자체의 잔존영상이 제거 되어 큰 영향은 주지 않을 것으로 예상된다. 그러나 영상 측광, 표면 측광의 경우 초기의 관측 영상과 후반부 관측 영상을 특정 암전자영상을 이용할 경우 보다 큰 오차를 유발할 가능성이 매우 커진다.

이러한 자료를 바탕으로 관측 대상 별이 같은 구경 내 같은 지점에 잔존영상으로 있다는 가정한다면 그림 6과 같은 측광 오차가 유발될 가능성이 있다. 이 그림은 이번 조사에서 사용된 값을 기준으로 작성된 것으로 그림 4의 중간 값에 해당하는 11,300ADU 값을 갖는 잔존영상이 포함될 때 나타날 수 있는 측광의 오차 범위를 나타낸 것이다. 그림의 가로축은 구경 내 입사되는 별 자체의 총 광량을 나타내며 하단부의 값은 M35를 관측할 당시 별의 V등급에 해당된다. 세로축은 잔존영상의 값이 더해지고, 자료 처리시 제거 되지 못할 때의 측광 오차를 등급으로 표시하였다. 마지막에 표시된 13.6 V등급 정도에서는 약 0.01 등급의 오차가 예상되나 비교적 S/N 비가 높은 15.3 등급의 별에서는 0.06 등급의 측광 오차를 포함하게 되어, 잔존영상이 정밀 측광에 많은 영향을 줄 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결론 및 토의

CCD 카메라의 잔존영상이 측광에 미칠 수 있는 영향을 알아보기 위해 레몬산천문대 1m 망원경에서 사용하고 있는 CCD 카메라를 이용하여 잔존영상의 존재를 확인하고, 잔존영상의 발생원인 및 관측에 미칠 수 있는 점들을 분석하였다.

M35의 관측 직후 얻은 암전자영상의 분석을 통하여 잔존영상의 존재를 확인하였다. CCD의 과포화로 잔존영상이 15.3 등급 정도의 별에 포함될 경우 약 0.06 등급 정도의 측광 오차가 포함될 수 있으며, 이 잔존영상은 약 180분 이내 지속됨을 확인 하였다. 시계열 측광의 경우 관측이 끝나자마자 관측 자료와 동일한 위치의 잔존영상이 포함된 암전자영상을 얻는다면 이때의 잔존영상은 암전자영상 보정에서 대부분 제거 되어 큰 측광 오차를 유발하지 않는다. 그러나, 하룻밤에 여러 대상을 관측하거나 여러 필터를 사용하는 경우 또는 표준화 관측등과 같은 정밀측광을 수행 할 때 잔존영상을 완전히 보정하기 어렵기 때문에 자료 처리시 이에 대한 충분한 검토가 필요하다.

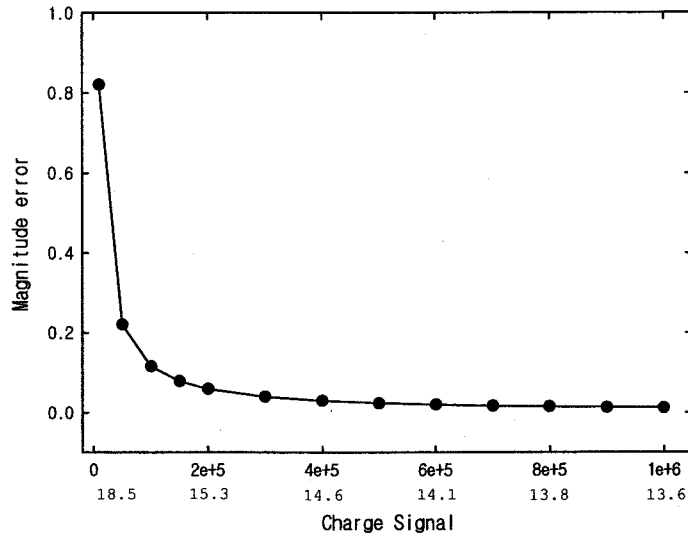


그림 6. 평균값의 잔존전하가 유발할 수 있는 측광 오차. 가로축은 1m 망원경으로 10분 노출 시 측광 가능한 등급과 그에 해당하는 광전자 수.

잔존영상은 CCD의 전원을 켜다 켜도 남아 있기 때문에 잔존영상의 효과를 최소화 하기 위해서는 CCD가 과포화된 후에는 반드시 충분한 노출의 암전자영상을 여러 장 얻어 잔존전하를 제거 하여야 한다. 잔존전하의 제거 방법은 시스템에 따라 그리고 온도, 작동 전압 등에 따라 다르기 때문에 정량적 수치를 알기 위해서는 각 시스템 별로 시험이 필요하다. 레몬산천문대 CCD의 경우에는 10분 노출의 암전자영상 18장 정도를 획득하면 잔존효과가 제거됨을 확인하였다.

여러 대학에서 주로 사용하는 전면조사 방식 CCD의 경우, 잔존영상이 측광 관측에 미치는 영향에 대하여 충분히 고려해 보아야 할 것이다. 후면조사 방식의 CCD는 이러한 현상이 일어날 가능성은 없으나 비교 분석할 필요가 있으며 과장과 노출 시간에 따른 분석 과정이 포함된 정량적 분석 체계가 마련되어야 할 것으로 여겨진다. 또한, 이를 바탕으로 향후 CCD 성능 분석 및 선정에 있어서도 잔존영상에 대한 충분한 검토가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- Biretta, J. A. & Mutchler M. 1998, WFPC2 Instrument Science Report, 97, 5
- Cavadore, C., Dorn, R., & Beletic, J. 2000, Charge Coupled Devices at ESO Performance and Results (München: ESO technical report)
- Jack, D. M. & Dyck, R. H. 1976, IEEE Journal of Solid-state circuits, 11, 160
- Janesick, J. R. 2001, Scientific Charge Coupled Devices (Bellingham: SPIE Press), pp.64-70
- Kim, C.-K., Early, J., & Amelio, G. 1972, Northeast Electron. Res. Eng. Meet., 72, 161
- Rest, A., Müdermann, L., Widenhorn, R., Bodegom, E., & McGlinnd, T. C. 2002, Review of Scientific Instruments. 73, 5